

文章编号: 1000-2022(2003) 04-0557-09

区域气候模式研究进展

陆其峰¹, 潘晓玲², 钟 科³, 李永东²

(1. 南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 新疆大学 干旱生态环境研究所, 新疆 乌鲁木齐 830046;
3. 解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101)

摘 要: 全面回顾了区域气候模式的分类、发展和最新研究动态, 指出区域气候模式研究有了长足的发展, 其中重要的有: 加入雪盖、土壤水等作用的陆面过程, 全球模式与区域细网格模式的嵌套由一维发展到三维, 由一层发展到多层, 发展了更加合理的参数化方案; 但也存在许多不足, 模式提供的植被资料与实情相差很大, 对于沙漠地区的植被盖度的算法不尽合理, 对次网格地形及对其湍流通量输送过程的刻画不够细致等。因此, 建议利用遥感手段采用非线性方法(如分形等)对遥感资料施行反演, 进行多尺度的双向模式嵌套。

关键词: 区域气候模式; 研究进展

中图分类号: P467 **文献标识码:** A

气候对人类经济和社会的发展有着重要的作用, 气候及其变化和人类活动对气候的影响已日益成为一个重要的科学问题。气候具有明显的区域性特征, 实际上区域气候及其变化对人类生活的影响更为直接, 比如地区洪涝等灾害常常威胁着人类的生存安全等, 所以对区域气候及其变化的研究引起了人们的极大关注, 对区域气候及其变化的模拟已经成为研究区域水平上的全球变化问题的关键性科学问题^[1]。

目前区域气候预测的数值模式一般采用全球模式嵌套一个区域细网格模式^[2]或者用全球模式作出预测后, 采用一个所谓下插(Downscaling, 它主要是通过区域气候尺度的预报量与 GCM 模式输出或大尺度地面观测资料建立统计模式)的统计方法来获得小范围的气候特征^[3]。从区域气候长期观测资料提取预测信息的观点出发, 基于非绝热作用和水汽平衡, 封国林等^[4]导出一个区域气候模式, 在全球模式嵌套一个区域细网格模式做法中又形成了 3 种不同思路的方法: (1) 提高大气环流模式 GCM 的分辨率, 这样做将使计算耗费大为增加, 模式积分异常缓慢。这种研究方法在当今的计算条件下实用价值不高。(2) 采用非均匀网格的 GCM, 在关心区域采用高分辨率, 而在其他区域采用低分辨率, 这样既能使模式详细描述关心区域的物理过程, 又不会使计算耗时大量增加。模拟结果^[5-6]表明在模拟区域内产生了有效的区域尺度信息, 提高了模拟精度, 具有良好的尺度转化效应。(3) 20 世纪 80 年代末在美国开始使用的

收稿日期: 2002-10-28; 改回日期: 2003-03-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 973 项目(G1999043503)

作者简介: 陆其峰(1975-), 男, 江苏淮阴人, 硕士生, 研究方向: 土地利用变化引起的气候效应。

区域气候模式 RCM 与大气环流模式 GCM 单向嵌套的方法,所用的区域气候模式 RCM 是引入了气候物理过程的中尺度有限区域模式 LAM。本文重点介绍第 3 种方法。

1 由 LAM 改进而来的区域气候模式 RCM 对区域气候的模拟

1.1 区域气候模式的建立及其对区域气候描述能力的检验

自 Giorgi 等^[7]将中尺度模式 LAM 与 GCM 模式单向耦合后,国内外陆续有人对耦合后的区域模式的参数化方案、资料同化等方面做了许多工作。

Giorgi 等^[7]和 Dickinson 等^[8]的研究结果从理论上证明:大尺度的大气运动对区域模式中的中小尺度特征的模拟有较大的控制甚至支配作用,所以,用准确的大尺度分析资料给区域模式提供较准确的初始条件和边界条件对区域模式的模拟很重要。

1989 年 Giorgi^[9]把美国中尺度模式 LAM 与 GCM 模式单向耦合,用于区域气候的模拟研究,从此人们开始利用由中尺度有限区域模式改造而成的区域气候模式 RCM 与 GCM 单向耦合来研究区域气候。1993 年 Giorgi 等^[10]和 Bates 等^[11]把 RegCM1 改进成 RegCM2。改进过程中对 Kou 的积云对流参数方案作了修改,并加入了 Grell 方案;把 CCM1 辐射包改为 CCM2;陆面过程进行了升级;边界层的同化中加入了指数松弛方案,并考虑不同尺度系统在不同高度层的作用等。

除美国国家大气研究中心(NCAR)外,许多国外的研究单位,如英国气象局(the United Kingdom Meteorological office),美国国家环境预报中心(NCEP)等,都开发了自己的区域气候模式。这些模式各有自己的特色,例如加拿大基于中尺度气象研究协作中心(the Cooperative Center for Research in Mesometeorology)的非静力中尺度模式,加入了加拿大气候模拟和分析中心(Canadian Center for Climate modeling and analysis)第二代 GCM 的次网格物理参数化包,改建而成的 RCM^[12],采用了高效的半隐式半拉格朗日方案,模式在积分时可采用较长的时间步长。Cocke 等^[13]用此模式对美国北部和北美西部作了模拟,发现 GCM 和 RCM 都能模拟出由 ENSO 导致的一些现象,但 RCM 能模拟出更详细的细节。

在国内,为了能够建立用于东亚地区的区域气候模式,研究人员作了不少工作,并取得了丰硕的成果。

沈桐立等^[14]对中尺度模式 MM4 作了侧边界嵌套及资料同化的处理,连续积分 6 个月,取得了较好的结果。这表明区域气候模拟是了解区域气候变化的有效方法之一,它具有 GCM 所不具有的一些优点,可以更为细致地描述局地大气环流变化的特征;万齐林等^[15]对美国科罗拉多州立大学的中尺度模式 RAMS 作了修改,在其边界引入一个缓冲区,使其能与 GCM 单向嵌套。改造后的 RAMS 具有短期气候模拟能力;龚威等^[16]在引进 NCAR 的 RegCM1 的基础上,考虑我国的气候特点,对模式加以改进,使其适用于我国的区域气候模拟。他们的改进包括:采用指数加线性的吸收边界方案和流入流出边界方案;采用准气压面的扩散方案;考虑中国特定的植被、海岸线及地形分布特征。改进后的模式具有模拟长江流域强降水过程的能力;全球变化东亚区域研究中心对 NCAR 中尺度非静力模式 MM5V2 作了改进,引入 CCM3 辐射包,耦合了 BATS 陆面过程方案,形成了区域气候模式 RIEMS。在参加区域气候模式的比较项目后,发现 RIEMS 在区域气候模拟方面具有良好的表现。

1.2 区域气候的模拟

1.2.1 国外的工作

为了研究美国大湖地区的湖面对区域气候的影响,利用耦合了湖模式的 RegCM2 作数值

模拟, 并进一步检验 RegCM 2 对湖区效应的长期气候模拟效果。

由于湖面与上游地区的水汽、热力和摩擦效应的差异, 广阔的湖区将使过水表面的气团变性, 进而影响区域气候。giorgi 等^[17-18]利用耦合了湖模式的 RegCM 2 作了大湖地区 1985 年冬季 10 d 的数值模拟。模拟过程中使用了 90、60、30、15 km 的分辨率, RegCM 2 模拟出了在湖区效应作用下产生的降水分布的基本特征, 说明在有雪带的降水模拟比其他区域对分辨率更敏感。

为了进一步检验耦合模式对湖区效应的长期气候模拟效果, Bates 等^[19]又对大湖地区作了长期气候模拟。模拟结果说明, 与湖面模式耦合的 RegCM 2 能够模拟湖面对气候有重要影响的区域气候。Jones 等^[20]用 the Meteorological Office Unified Forecast/Climate Model System 的 GCM 和 RCM 对欧洲气候作了 10 a 的模拟。模拟结果表明, 比起 GCM 来, RCM 的模拟结果中具有更强的垂直速度, 从而导致了区域降水有 18 % 的增量, 同时模式的对流层变干变暖。

由于 NCAR 的 RegCM 2 中包含有陆面过程模式 BATS, 因而可以用来研究陆面水循环。Giorgi 等^[21]等用 RegCM 2 对美国地区作了连续 3 a 的积分, 发现模式能够模拟出区域中水循环收支的季节变化, 这表明 RegCM 2 可以用于陆面水循环的研究。

1.2.2 国内的工作

(1) 东亚季风气候的模拟

我国东部的气候是典型的季风气候, 为了研究亚洲东部这一具有代表性的气候, 研究人们用不同模式作了大量的模拟试验。

赵宗慈等^[22]用 3 个区域气候模式作了 1991 年东亚夏季(5—8 月)气候的模拟, 结果表明 3 个区域气候模式成功地模拟了 1991 年夏季发生在我国江淮流域及日本南部的洪涝灾害和几次特大暴雨过程以及相应的大气环流形势的分布; 罗勇等^[23]单独用 RegCM 2 对同一事件作了区域气候模拟; Wang 等^[24]用钱永甫的混合坐标原始方程组, 在中国南海季风实验数据的驱动下, 进行数值积分, 通过敏感性试验发现, 嵌套边界条件的改进对模拟结果特别是对降水有很大影响, 模式也模拟出了中国南海季风的爆发; 万齐林等^[25]把 GCM (9 层全球谱模式) 与 CSU-RAMS 单向耦合, 试验结果表明: CSU-RAMS 与 GCM 嵌套能以实况资料为初值作月尺度的短期气候预测, 嵌套于 GCM 中的区域中尺度模式能够作出比 GCM 模式更为细致的预测。

(2) 西北干旱气候的模拟

我国西北地区位于亚欧大陆腹部、与青藏高原相连, 海洋上的暖湿气流难于到达。在各种因素的作用下, 西北地区成为我国也是世界上最干旱的地区之一。而干旱导致的水资源匮乏给西北地区的工、农和牧业造成了巨大的障碍。为了开发西北地区, 推动西北地区的经济发展, 很有必要对西北地区气候进行模拟研究。

刘黎平等^[26]用中尺度模式 MM4 与一个菱形截断 15 波的 9 层 GCM 单向耦合, 模拟了我国西北及青藏高原夏季气候的平均状态。区域模式与 GCM 嵌套后, 模拟结果有明显改善, 它成功地再现了西北和青藏高原地区夏季的区域气候特征(包括某些中尺度特征), 分辨出了大气环流模式难以详尽描述的高原气候特征。

1.3 区域气候变化的模拟

区域气候的变化有自然变化的成分, 例如地球自转轴倾斜角度的周期性变化, 会引起气候的变化。钱云等^[27]曾对区域气候的自然变化作过数值模拟。他们用嵌套在大气环流模式中的

区域气候模式进行数值试验,探讨了以末次冰期为背景的大尺度强迫引起的大气环流和区域内下垫面条件异常等中尺度强迫影响区域气候变化的过程和机制。数值试验表明,前者对区域气候变化的作用大于后者。

区域气候在自然变化的同时,也有因人类活动而导致变化。人类的生产和生活极大地改变着自然界:大气中的 CO_2 含量越来越高,大量植被遭到破坏,植被类型发生改变等。Jone 等^[28]对欧洲气候用 GCM 和 RCM 作了 CO_2 加倍的情形下的欧洲气候的 10 a 模拟发现强降水的频率在 RCM 和 GCM 中都提高了,但 RCM 中提高的比例小一些;李维亮等^[29]用其通过改进 RegCM 2 而得到的区域气候模式对中国地区在 CO_2 倍增后气候的变化作了模拟。模拟结果表明由于区域气候模式考虑了复杂地形下垫面的特征,其结果比全球模式模拟得更为合理。

陆面上的植被覆盖率、植被类型的变化将通过陆气间的相互作用引起区域气候的变化。Zheng 等^[30]用 ECMWF 的资料驱动 RegCM 2,对华北夏季气候作了两个试验:一个正常模拟,一个使华北中、北部的草地沙漠化。模式从 1991 年 6 月 1 日积分到 8 月 31 日,得到了与观测结果很相近的降雨季季节演变和分布特征。试验 2 的结果表明沙漠化使华北中部在 6 月的涝季中降雨减少;Zheng 等^[31]还在植被转换线南移或北移的情况下,取 1997 年(干年)和 1996 年(湿年),用中国国家气象中心的数据驱动 RegCM 2。模拟结果表明:在植被转换线南北移动时,会在很大程度上影响陆气间的水、热平衡,对中国北方气候造成很大的影响;孙健等^[32]设计了几组试验,把 1997 年的逐月植被类型、粗糙度和逐季的反照率代替 RegCM 中的多年平均的陆面特征参数,模拟结果表明,陆面特征参数的变化对区域气候模拟具有作用。

1.4 区域气候模式的改进

1.4.1 陆面过程

大气和陆面(植被、土壤和水面)之间,通过能量、动量和水汽的交换,形成了一个密不可分的整体。能否拥有一个能准确、细致地描述陆气间相互作用的陆面过程模式是区域气候模式在模拟中取得成功的关键。

20 世纪 80 年代中期以来, Henderson-Sellers 等^[33]、Dickinson 等^[34]、Shuttleworth 等^[35]、Shukla 等^[36]先后针对 Amszon 流域热带雨林的砍伐问题,进行了大量的敏感性研究。Xue 等^[37]、Nicholson 等^[38]研究了非洲 Sahal 的沙漠化问题。所有这些敏感性研究从不同角度表明了陆面边界条件的变化能够引起模式气候的显著变化;汤建平等^[39]把赵鸣等在 1995 年建立的土壤—植被—大气相互作用模式(SVA)引入 NCAR 的 RegCM 2 中,把近地层引入了区域气候模式中,用 1991 年梅雨期的实测资料作了 3 组试验。结果表明:引入 SVA 的 RegCM 2 有着更好的对较长天气过程的模拟能力;SVA 在近地层中实现土壤、植被与大气间的通量交换,改善了地表、土壤、植被和大气间的通量交换(如垂直速度、涡度和散度)的变化,进一步导致模式模拟的降水、温度发生改变,使模拟结果更加合理。

积雪模型的发展与改进。Loth 等^[40]、Lynch-Steglitz 等^[41]、Sun 等^[42]先后发展了应用于 GCM 的多层积雪模型,这些模型考虑了积雪的压实、变形以及积雪中的液体水流等,对积雪变化的描述更加全面;RegCM 2 的 BATS 虽然对陆气作用有较强的描述能力,但自身还是存在一些缺点:它采用强迫—恢复法计算土壤的温、湿度,其中加入了一些不符合实际的条件限制,另外 BATS 对雪盖的处理也很简单,没有详细考虑积雪内部的过程,这些都会影响到模拟的效果,尤其是在有雪区。史学丽等^[43]对 BATS 作了改进和简化。改进的模式有 6 层土壤、3 层积雪和 1 层植被。土壤的温、湿用物理方程精确求解,分开考虑雪和土壤,详细考虑积雪内部的形变和水分与能量的变化过程,把改进的陆面过程耦合到 RegCM 2。

在区域气候模拟中, 大气与下垫面间的动量和能量的交换非常重要, 要计算好这些交换的重要环节之一是确定其交换系数。在 RegCM 2 中采用 Dickenson 的交换系数, 具有一定的不完善之处, 万齐林^[44]对此作了改进, 提出一种适合 RegCM 2 的改进算法。

1.4.2 积云对流参数化

与积云有关的物理过程由积云对流参数化来描述, 改进积云对流参数化可以提高模拟效果。Molinari^[45], Zhang 等^[46] 对中尺度模式中降水过程描述和积云对流参数化问题作出精辟综述, 认为: 当网格距减少到 50 km 以下, 一般传统的参数化方案就不再适用于混合方式, 即对网格尺度与次网格尺度分别使用显式和隐式方式^[45-46]。Zhang 等^[47-48] 使用混合方式成功模拟和分析了发生在美国的强对流暴雨和雹线过程。

在近几年发展并为中尺度模式成功应用的有: Grell (GR) 方案^[49], Kain-Fritsch (KF) 方案^[50], 其中 GR 方案是具有参数化下沉气流的 AS 方案的单种云简化方案, 另外, BM (Betts-Miller) 方案近几年在 ECMWF 和 NCEP 进行了许多改进试验^[51]; 刘一鸣等^[52] 在综合比较各种积云对流参数化的基础上, 主要考虑了陈伯民等修正的 ECMWF 的质量通量积云参数化方案, 对其进行简化和修改, 并发展了一个质量通量积云对流参数化方案 (MFS)。MFS 是一个综合方案, 用总体云模式来描述积云与环境的相互作用, 同时考虑了深对流和浅对流; Huang 等^[53] 认为在东亚地区, 夏季降水云系往往是积云和层云的混合, 而 Kuo 方案能够反映东亚夏季风降雨云系的特征, 所以 Kuo 方案较适合于夏季风和环流的模拟。

方案中关键性参数的试验。翟国庆等^[54] 利用 RegCM 2, 对 Betts-Miller 对流参数化方案中影响参考态的几个关键性参数: 稳定度参数、云底和冻结层参考态的饱和气压, 以及对流调整时间进行了敏感试验。

1.4.3 辐射方案

RegCM 1 中采用的是 NCAR 的大气环流模式 CCM 1 的辐射包, 而 RegCM 2 使用了大气环流模式 CCM 2 的辐射包。丁一汇等^[55] 把 RegCM 2 中的辐射包由 CCM 2 的辐射包改为 CCM 3 的辐射包, 由于考虑了痕量气体和更为真实的气溶胶分布, 考虑了可变的云中冰粒的半径, 因此得到更为接近实际的降水模拟。

在将非平衡态热力学理论应用于大气科学的过程中, 不少学者进行了大量的开创性工作, 其中有 Paltridge^[56-57], Dutton^[58], Grassl^[59], Shutts^[60] 的研究, 国内有柳崇健^[61], 钱维宏^[62], 仪垂祥^[63] 的研究。

1.4.4 初始资料的同化处理

在资料同化处理方面做出的主要改进有:

Derber^[64] 首先提出用修正模式的方法来替代修正初始场进行变分四维同化; Zupanski^[65] 则进一步在同化过程中将初始场和模式误差均作为控制量加以修正。他引进了张弛逼近法 (Nudging)^[49], 四维变分资料同化 (4DVAR)^[66-67], 前者使资料同化易实现, 而且计算时间也不长, 但不能直接同化模式不能预报的变量, 后者是将动力约束和资料约束以及不同时刻的观测资料统一考虑。

沈桐立等^[68] 用统计反演法把卫星云图的灰度值反演为非常规温、湿观测场, 然后用变分法与常规观测的温、湿场同化, 用同化后的资料作为 MM 4 的初值对 1992 年 6 月 13—14 日发生在长江流域的一次暴雨过程作了数值模拟, 发现使用同化资料后, 雨区的模拟得到了改善。

2 存在的问题和发展趋势

从区域气候模式的研究和发展来看, 近年来区域气候模式研究取得了很大的进步, 但仍然

存在许多问题:

(1) 模式所提供的植被资料与中国的实情相差很大, 还需通过卫星遥感反演等各种手段来细化植被资料。

(2) 对于西北干旱区如新疆, 雪水补给是十分重要的补给来源, 但雪盖模式并不完善, 不能很好地刻画融雪的气候效应。

(3) 对于沙漠地区的植被盖度的算法并不算合理, 百分之二十的植被与全部算为沙漠的植被类型对于干旱区意义绝不相同。

(4) 对次网格地形及对其湍流通量输送的过程的刻画并不细致。

因此, 在未来几年, 区域气候模式研究应注重以下几个方面工作:

(1) 对气候典型区如西北干旱区(新疆)进行大尺度野外观测。

(2) 利用遥感手段采用非线性方法(如分形等)对遥感资料进行反演。

(3) 进行多尺度的双向模式嵌套, 如 GCM 与区域气候模式的双向嵌套、陆面模式与区域气候模式的双向嵌套、沙尘暴模式与区域气候模式的嵌套等。

参考文献:

- [1] 符淙斌, 叶笃正. 全球变化和我国未来的生存环境[J]. 大气科学, 1995, 19(2): 116-126.
- [2] Juang H M H, Kanamits M. The NMC nested regional spectral model. [J] Mon Wea Rev, 1994, 122(1): 3-26.
- [3] Storch V H, Zorita E, Cubasch U, et al. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberrian rainfall in wintertime[J]. J Climate, 1993, 6(6): 1161-1171.
- [4] 曹鸿兴, 封国林, 魏凤英. 区域气候预测自记忆模式[J]. 气象学报, 1999, 57(4): 462-472.
- [5] 沈桐立, 丁一汇, 覃丹宇, 等. 短期气候变化的模拟中非均匀网格应用的研究[C]. 中国短期气候预测的模式研究. 北京: 气象出版社, 1996: 165-177.
- [6] Fox-Rabinowitz S M, Lawrence L T, Ravi C G, et al. A variable-resolution stretched-grid general circulation model: regional climate simulation[J]. Mon Wea Rev, 2001, 129(2): 453-469.
- [7] Giorgi F, Bates G T. The climatological skill of regional model over complex terrain[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(11): 325-347.
- [8] Dickinson R E, Errico M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western USA[J]. Climatic Change, 1989, 15(3): 383-412.
- [9] Giorgi F. Simulation of regional climate using a limited-area model nested in a general circulation model[J]. J Climate, 1990, 3(8): 941-963.
- [10] Giorgi F, Bates G T, Nieman S. The multi-year surface climatology of a regional atmospheric model over the western United States[J]. J Climate, 1993, 6(1): 75-95.
- [11] Bates G T, Giorgi F, Hostetler S W. Towards the simulation of the effects of the Great Lakes on regional climate[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(5): 1373-1387.
- [12] Caya Daniel, Rene Laprise. A Semi-Implicit Semi-Lagrangian regional climate model[J]. Mon Wea Rev, 1999, 127(3): 341-362.
- [13] Cocke S, Larow T E. Seasonal predictions using a regional spectral model embedded within a coupled ocean-atmosphere model[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128(3): 689-708.
- [14] 沈桐立, 丁一汇, 王咏青, 等. 区域气候模拟的可行性研究[C]. 中国短期气候预测的模式研究. 北京: 气象出版社, 1996: 178-185.
- [15] 万齐林, 施永年. CSU-RAMS 模式在区域气候模拟中的应用[J]. 热带气象学报, 1996, 12(2): 152-159.
- [16] 龚威, 李维亮. 中国区域气候模式的建立和模拟试验结果的分析[C]. 气候变化规律及其数值模拟研究论文第二集. 北京: 气象出版社, 1996: 273-288.
- [17] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second generation regional climate model (RegCM2) I: Bound-

ary layer and radiative transfer processes[J]. *Mon Wea Rev*, 1993, 121(10): 2 794–2 813.

- [18] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, et al. Development of a second generation regional climate model (RegCM2) II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions[J]. *Mon Wea Rev*, 1993, 121(10): 2 814–2 832.
- [19] Bates G T, Hostetler S W, Giorgi F. Two-year simulation of the Great Lakes region with a coupled modeling system [J]. *Mon Wea Rev*, 1995, 123(5): 1 505–1 522.
- [20] Jones R G, Murphy J M, Noguer M. Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model I: assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries[J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1995, 121(526): 1 413–1 499.
- [21] Giorgi F, Hostetler S W, Shields C B. Analysis of the surface hydrology in a regional climate model[J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1994, 120(515): 161–183.
- [22] 赵宗慈, 罗 勇. 东亚夏季风的模拟研究—3 个区域气候模式的对比[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(增刊): 116–123.
- [23] 罗 勇, 赵宗慈. NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(增刊): 124–134.
- [24] Wang Shiyu, Qian Yongfu. Modeling of the 1998 East Asian summer monsoon by a limited area model with p - σ incorporated coordinate[J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(2): 209–224.
- [25] 万齐林, 梁建茵, 施永年. 月尺度区域气候数值预测试验[J]. *热带气象学报*, 1996, 12(4): 349–355.
- [26] 刘黎平, 钱永甫, 吴爱明. 区域模式和 GCM 对青藏高原和西北地区气候模拟结果的对比分析[J]. *高原气象*, 2000, 19(3): 313–322.
- [27] 钱 云, 钱永甫, 张耀存. 末次冰期东亚区域气候变化的情景和机制研究[J]. *大气科学*, 1998, 22(3): 281–293.
- [28] Jones R G, Murphy J M, Noguer M, et al. Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate mode II: Comparison of driving and regional model responses to doubling of carbon dioxide[J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1996, 122(529): 265–292.
- [29] 李维亮, 龚 威. 中国区域气候模式对中国地区的区域性气候变化情景的模拟[C]. 气候变化规律及其数值模拟研究论文第二集. 北京: 气象出版社, 1996: 255–272.
- [30] Zheng Weizhong, Ni Yunqi. A numerical experiment study for effects of the grassland desertification of summer drought in north China[J]. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16(2): 251–262.
- [31] Zheng Weizhong, Ni Yunqi. Numerical experiment for the influence of the transition zone migration on summer climate in north china[J]. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16(3): 367–377.
- [32] 孙 建, 李维亮, 周秀骥. 陆面特征参数季节变化对我国气候影响的数值模拟[C]. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000: 232–242.
- [33] Henderson-Sellers A, Dickinson R E, Wilson M F. Tropical deforestation: important processes for climate models[J]. *Climatic Change*, 1988, 13(1): 43–69.
- [34] Dickinson R E, Henderson-sellers A. Modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parameterization [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1988, 114(480): 439–462.
- [35] Shuttleworth W J, Dickinson R E. comments on modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parameterization[J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1989, 115(489): 177–179.
- [36] Shukla J, Nobre C, Sellers P J. Amazonian deforestation and climate change[J]. *Science*, 1990, 247(4948): 1 322–1 325.
- [37] Xue Y, Shukla J. The influence of land surface properties on sahal climate part I: desertification[J]. *J climate*, 1993, 6(12): 2 232–2 245.
- [38] Nicholson S E, Tucker C J. Desertification, drought and surface vegetation: an example from the west African sahel [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(3): 815–819.
- [39] 汤剑平, 苏炳凯, 江 静, 等. 一个引入近地层的区域气候模式[J]. *大气科学*, 2001, 25(2): 221–230.
- [40] Loth B, Graf H F. Snow cover model for global climate simulation[J]. *J Geophys Res*, 1993, 8(D6): 10 451–10 464.
- [41] Lynch-Stiegilitz M. The development and validation of simple snow model for the GISS GCM[J]. *J Climate*, 1994, 7(12): 1 842–1 855.
- [42] Sun Shufen, Jin Jiming, Yongkang Xue. A simple snow-atmosphere-soil transfer model[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104(D16): 19 587–19 597.
- [43] 史学丽, 丁一汇. 陆面过程模式与区域气候模式的耦合[C]. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社,

2000: 243–252.

- [44] 万齐林. RegCM2 中大气和下垫面交换系数算法的改进和试验[C]. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000: 253–261.
- [45] Molinari J, Dudek M. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review [J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(1): 326–344.
- [46] Zhang D L, Kain J S, Fritsch J M, et al. Comments on “parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review” [J]. Mon Wea Rev, 1994, 122(9): 2 222–2 231.
- [47] Zhang D L, Fritsch J M. Numerical simulation of the meso-scale structure and evolution of the 1977 Jonstown flood Part 2: Intertially stable warm-core vortex and the mesoscale convective complex[J]. J Atmos Sci, 1987, 44(18): 2 593–2 612.
- [48] Zhang D L, Gao K. Numerical simulation of an intense squall line during 10–11 June 1985 PRESIDRM, Part 2: Rear inflow, Surface Pressure perturbation and stratiform precipitation[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(9): 2 067–2 094.
- [49] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A Description of the fifth-generation Penn state/ NCAR Mesoscale Model(MM5) [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN– 398+ STR, 1994: 138.
- [50] Kain J S, J M Fritsch. A one-dimensional entraining/ detraining plume model and its application in convective parameterization[J]. J Atmos Sci, 1990, 47(23): 2 784–2 802.
- [51] Janjic Z I. The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. Mon Wea Rev, 1994, 122(5): 927–945.
- [52] 刘一鸣, 丁一汇. 修正的质量通量积云对流参数化方案对 1991 年洪涝过程的模拟及敏感性试验[C]. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000: 262–271.
- [53] Huang Ronghui, Wu Bingyi, Sung-Gil Hong. Sensitivity of numerical simulation of the East Asia summer monsoon rainfall and circulation to different cumulus parameterization schemes[J]. AMS, 2001, 18(1): 23–41.
- [54] 翟国庆, 高 坤, 潘劲松. 区域气候模拟中 Betts-Miller 对流参数化方案的敏感性试验[C]. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000: 272–286.
- [55] 丁一汇, 钱永甫, 颜 宏, 等. 高分辨率区域气候模式的改进及其在东亚持续性暴雨事件模拟试验中的应用[C]. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000: 217–231.
- [56] Paltridge G W. The steady-state formate of global climate[J]. Q J R Meteorol Soc, 1978, 104(442): 927–945.
- [57] Paltridge G W. The thermodynamics dissipation and the global climate system[J]. Q J R Meteorol Soc, 1981, 107(453): 531–547.
- [58] Dutton J A. The global thhermodynamicas of atmospheric motion[J]. Tellus, 1973, 25(2): 89–110.
- [59] Grassl H. The climate at maximum entropy production by meridian atmospheric and oceanic heats fluxes[J]. Q J R Meteorol Soc, 1981, 107(451): 153–166.
- [60] Sutts G J. Maximum entropy production states in quasieges trophic dynamical model[J]. Q J R Meteorol Soc, 1981, 107(453): 503–520.
- [61] 柳崇健. 大气耗散结构理论[M]. 北京: 气象出版社, 1988.
- [62] 钱维宏. 大气中的耗散结构与对流运动[J]. 大气科学, 1992, 16(1): 84–91.
- [63] 仪垂祥. 大气系统中的熵[J]. 大气科学, 1989, 13(3): 367–372.
- [64] Derber J C. A variational continuous assimilation technique[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(10): 2 437–2 446.
- [65] Zupanski M A. Preconditioning algorithm for large-scale minimization programs[J]. Tellus, 1993, 45A(9): 478–492.
- [66] Wang Z, Droegemeier K K, White K, et al. Application of a new adjoint Newton algorithm to the 3D AEPS Storm-scale model using simulated data[J]. Mon Wea Rev, 1997, 125(10): 2 460–2 478.
- [67] Errico R M, Raeder K, Vukicevic K. Mesoscale adjoint modeling system version 1[R]. NCAR Tech Note, NCAR/TN– 41+ IA, 1994.
- [68] 沈桐立, 闵锦忠, 丁一汇. 在区域气候模拟中卫星云图资料变分同化的试验研究[C]. 中国短期气候预测的模式研究. 北京: 气象出版社, 1996: 133–143.

Advances in Regional Climate Model Studies

LU Qi-feng¹, PAN Xiao-ling², , ZHONG Ke³, LI Yong-dong²

(1. Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China;

2. Institute of Arid Ecology and Environment, Xingjiang University, Urumqi 830046;

3. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

Abstract: The classification, development work and recent advances of regional climate models are reviewed comprehensively in this paper. Great advances in regional climate model have been made in the recent years. The main advances are: introducing snow-cover and soil-water into regional climate models; the development of the regional climate model nested in a general circulation model from 1D to 3D and from 1 layer to multi-layers; the development of more reasonable parameterization schemes. But there are still some defaults, such as, the inadequate calculation method of vegetation cover in desert, and rough depection in sub-grid topogtaphy and turbulent flux transfer etc. Therefore, nonlinear methods(fractal etc) for the retrieval of remote sensing date and the multi-scale two-direction nesting are suggesed to be used in future regional climate simulations.

Key words: regional climate model; recent advances